



Možnosti aplikace rentgenové tenzometrie ve strojírenské technologii

Doc. Ing. Nikolaj Ganev, CSc., Ing. Zdenek Pala

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Trojanova 13, 120 00 Praha 2, nikolaj.ganev@jfifi.cvut.cz

Anotace

Rozvoj techniky je doprovázen růstem požadavků na konstrukci a technologii výroby strojů a zařízení. Provozní spolehlivost a životnost strojírenských výrobků jsou nejen funkcí složení výchozích materiálů, ale i technologického postupu použitého při jejich zpracování. V této souvislosti se objevuje ještě jeden významný faktor určující provozní spolehlivost a životnost strojních dílů a konstrukcí. Jsou jimi mechanická napětí vznikající uvnitř těles jako důsledek působení vnějších sil nebo jiných příčin. Analýza zbytkových napětí má proto při diagnostice materiálů stejný význam jako klasické metody výzkumu vlastností (pevnost, tvrdost, oteřuvzdornost, odolnost vůči korozi aj.).

Z nedestruktivních způsobů analýzy zbytkové napjatosti polykrystalických látek se nejspolehlivěji osvědčuje rentgenová tenzometrie. Příspěvek bude věnován základním principům rentgenové tenzometrie a jejím specifickým rysům. Možnosti aplikace této metody experimentální fyziky budou ilustrovány zkušenostmi laboratoře strukturní rentgenografie FJFI ČVUT v Praze.

Klíčová slova: zbytková napětí, rentgenová tenzometrie, balotínování

1. Zbytková mechanická napětí

Napětí existující v tělesech při účinku vnějších sil nebo jiných (nemechanických) příčin nazýváme vložena. Zbytková napětí jsou přítomná v tuhých tělesech, na něž nepůsobí žádné vnější síly ani momenty a v nichž neexistují žádné teplotní gradienty. V zásadě nejsou žádná reálná tuhá tělesa zcela bez zbytkových napětí; zpravidla se vyskytuje větší počet různých druhů zbytkové napjatosti zároveň. U polykrystalických látek se rozlišují zbytková napětí I., II. a III. druhu [1, 2].

Napětí I. druhu jsou důsledkem inkompatibilitý deformací mezi makroskopickými oblastmi uvažovaného objektu. Předpokládáme je ve velkých oblastech přibližně homogenní, tj. konstantní co do směru a velikosti; v celém objemu objektu dosahují zbytková napětí I. druhu, nazývaná také makroskopická, rovnováhy.

Zbytková napětí II. druhu definujeme analogicky. Rozdíl je pouze v tom, že objemy, v nichž uvažujeme napětí homogenní, jsou dány velikostí jednotlivých krystalků. Ve vícefázových soustavách mohou být krystalky různých fází napjaty opačně.

Zbytková napětí III. druhu – napěťová pole doprovázející mřížkové poruchy v reálných krystalech – jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností.

Stav zbytkové napjatosti je v každém bodě tělesa superpozicí zbytkových napětí I., II. a III. druhu. Pro technickou praxi jsou důležitá především makroskopická zbytková napětí. Jejich existence se projevuje řadou prakticky významných efektů. Mezi nejznámější patří

- rozměrové a tvarové změny v důsledku porušení napěťové rovnováhy,
- účinek tlakových předpětí na životnost, provozní spolehlivost a korozní odolnost součástí.

2. Tenzometrické metody

Ke zjišťování stavu napjatosti v modelech i reálných tělesech existuje dnes velký počet experimentálních postupů. Napětí je odvozená veličina, nedá se tedy stanovit přímo, ale buď výpočtem z naměřené deformace pomocí Hookova zákona nebo ze známé závislosti vhodné magnetické, elektrické, akustické, elektrické či optické veličiny na napětí. K nejrozšířenějším způsobům měření zbytkových napětí patří v současné době metody

- mechanické (založené na měření deformací doprovázejících porušení napěťové rovnováhy při odstranění části objemu zkoumaného vzorku),
- optické (fotoelasticimetrie), interferenční (Electronic Speckle Pattern Interferometry),
- magnetické (využívající závislost mezi napětím a některými magnetickými charakteristikami),
- ultrazvukové (vycházející ze vztahu mezi napětím a rychlostí šíření ultrazvukových vln),
- difrakční (rentgenografické a neutronografické).

Žádný z používaných způsobů určování zbytkových napětí není zcela univerzální. Jednotlivé metody se dají zpravidla úspěšně aplikovat vždy jen na určité druhy materiálů (krystalické, průhledné, feromagnetické, ...) a stavy napjatosti (povrchové, objemové). Pro svou dostupnost, propracovanost a nedestruktivní povahu má mezi nimi zcela dominantní postavení metoda založená na měření meziatomových vzdáleností v krystalcích polykrystalických materiálů pomocí rtg difrakce.

Předpověď distribuce zbytkových napětí, vyvolaných za určitých známých podmínek, může být principiálně formulován také pomocí matematického modelování. Ani v tomto případě však experimentální tenzometrické metody neztrácejí svůj význam. Analýzou vybraných stavů zbytkové napjatosti poskytují počítačovým simulacím zcela nepostradatelné údaje pro verifikaci výpočtů.

3. Základní principy a vlastnosti difrakční tenzometrie

Podstatou rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím. Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima, pokud je rozdíl drah obou paprsků celočíselným násobkem vlnové délky λ použitého záření, tj. platí-li Braggova podmínka

$$(1) \quad n\lambda = 2d \sin \theta,$$

kde d je vzdálenost sousedních rovin typu (hkl) . Působením mechanického napětí se změní jak mezirovinná vzdálenost d , tak i úhlová poloha θ . Diferencováním (1) dostaneme vztah

$$(2) \quad \varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cotg \theta_0 (\theta - \theta_0)$$

mezi mřížkovou deformací ε v napjatém krystalu a úhlovým posunem interferenčního maxima $(\theta - \theta_0)$; d_0 a θ_0 jsou hodnoty d a θ odpovídající nenapjatému krystalu.

Stanovené deformace pak přepočteme na napětí pomocí vztahů teorie elasticity.

Rentgenografické měření zbytkových napětí má některé specifické rysy, kterými se odlišuje od jiných metod experimentální analýzy napětí:

- Možnost volby různých směrů měření deformace mezirovinných vzdáleností vzhledem k povrchové normále zkoumaného objektu připouští v mnoha případech stanovit napětí bez znalosti struktury nenapjatého materiálu. Metoda má pak nedestruktivní charakter.
- Pomocí vlnových délek rentgenového záření používaného ve strukturní rentgenografii jsou získány difrakční informace z relativně velmi tenké ($10^{-2} - 10^{-3}$ mm) povrchové vrstvy.
- Selektivní povaha difrakce záření dává možnost stanovit napětí na jednotlivých složkách vícefázových soustav.
- Makroskopická napětí se projevují na difrakčních diagramech změnou polohy difrakčních linií. Vznik mikroskopických napětí je doprovázen rozšířením linií. Difrakční metodou se proto dají napětí I. a II. druhu navzájem separovat.

- Použijeme-li experimentální uspořádání s úzkým svazkem paprsků dopadajících na zkoumaný povrch materiálu (ozářená plocha může být i menší než 1 mm^2), lze proměřovat velmi nehomogenní napěťová pole.
- Protože se vzdálenost rovin v krystalické mřížce mění pouze elastickou deformací a nikoliv deformací skluzem, detekuje rentgenová tenzometrická metoda spolehlivě pouze mechanická napětí odpovídající změnám mezirovinných vzdáleností.
- Z povahy difrakčního experimentu ovšem vyplývá omezení tenzometrického výzkumu jen na krystalické (polykrystalické) materiály. Přesnost a spolehlivost tohoto způsobu analýzy napětí klesá s rostoucími rozměry krystalků a jejich přednostní orientací ve zkoumaném objektu.

4. Vývoj metodiky rentgenografického stanovení napětí [3]

I když princip měření napětí byl Hookovým zákonem „jaké prodloužení, taková síla“ formulován již v roce 1678, k jeho difrakční interpretaci došlo však teprve o 250 let později. Nejstarší informace o rentgenografickém výzkumu změn, které jsou v pevných látkách vyvolány vnějšími silami, pocházejí z roku 1922 od Joffeho a Kirpičevové [4]. Jejich metoda určování elastických konstant monokrystalů na základě měření polohy difrakčních skvrn lauegramů zatíženého a odlehčeného vzorku vycházela z Braggovy rovnice. V jejím využití pokračoval Joffe i později při studiu anizotropie teplotní závislosti meze pružnosti monokrystalů kamenné soli, síranu vápenatého a některých přírodních minerálů [5].

Pro měření napětí v polykrystalických materiálech aplikovali difrakci rentgenového záření poprvé až Lester a Aborn [6]. Článek, který uveřejnili v USA na přelomu let 1925 – 26, se zabýval studiem změn mezirovinných vzdáleností krystalků α -Fe při elastické deformaci tenkého ocelového vzorku. Použité uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody dovozovalo však jen registraci difrakčních linií o nízkých úhlech, a tedy malou přesnost měření. Získané výsledky přesto jednoznačně ukázaly, že se mezirovinné vzdálenosti mění lineárně s vloženým napětím.

Praktický význam pro měření napětí získala rentgenová difrakční analýza až po roce 1930, kdy se začalo používat uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody na zpětný odraz, umožňující větší přesnost stanovení mřížkových deformací. Z tohoto období pocházejí tři základní způsoby měření napětí (metoda kolmého dopadu, metoda dvou expozic a metoda jedné expozice), označované dnes často jako klasické [7 – 10].

Rentgenová difrakční metoda je v Československu využívána k měření zbytkových napětí již od roku 1936. Napětí měřila v Československu pomocí rentgenových paprsků pravděpodobně jako první Adéla Kochanovská, když v roce 1936 hledala na žádost Škodových závodů příčinu praskání obalů pancéřových granátů. Protože se získané poznatky týkaly vojenské techniky, nemohly být publikovány.

Tenzometrická analýza se do té míry zjednodušila, že k výpočtu napětí stačilo změřit jen vzdálenost mezi zvolenou difrakční linií a vhodnou linií referenční. V dalších letech pokračoval vývoj rentgenové tenzometrie vypracováním metod pro úplný popis neznámého stavu dvojsose napjatosti a směru hlavních napětí v povrchových vrstvách elasticky deformovaných objektů [11 – 16].

V rozmezí let 1957 – 1961 byly vypracovány tři měřící postupy založené na stejném principu umožňující přesnější a spolehlivější měření makronapětí než metody klasické. Nový způsob měření zbytkových makronapětí nazvali jeho autoři metodou šesti expozic [16], metodou šikmých snímků [17] a metodou $\sin^2\psi$ [18]. V současné době se až na výjimky užívá posledního názvu. Metoda $\sin^2\psi$, která zahrnuje klasické rentgenografické tenzometrické metody jako své speciální případy, představuje dodnes východisko pro hodnocení stavů zbytkové napjatosti. Víceexpoziční metody byly přijímány bez výhrad k řešení různých materiálových problémů souvisejících s dvojsose i trojosou napjatostí až do začátku 70. let. Tehdy se jako důsledek rozvoje detekční a vyhodnocovací techniky začaly stále častěji

objevovat v souvislosti s experimentálními výsledky rentgenografických měření napětí závěry typu: zvolená rovina (*hkl*) se nehodí k měření, závislosti $\varepsilon(\sin^2\psi)$ nejsou lineární, při úhlech $+\psi$ a $-\psi$ dostáváme různé deformace (ψ -rozštěpení).

Stanoviska různých pracovišť k těmto anomáliím se lišila, zjištěné závislosti byly i přes zjevnou nelinearitu často interpretovány přímkou a odchylky zdůvodňovány statistickým rozptylem. Situace vedla ke skepsi, která se dala charakterizovat otázkou: co vlastně měříme? Zároveň s diskusí o smyslu difrakční tenzometrické analýzy došlo k systematickému teoretickému i experimentálnímu studiu možných faktorů nelinearity. Především byl přehodnocen vliv hloubky vnikání rentgenových paprsků do technických materiálů na výsledky měření. Tím byl vytvořen prostor pro vysvětlení parabolické nelinearity pomocí gradientu napětí ve směru kolmém k povrchu. Efekt rozštěpení se podařilo vysvětlit sklonem roviny hlavních napětí vzhledem k povrchu vzorku (nezávisle na tom, zda je gradient napětí nulový či nikoliv) a hadovité průběhy mřížkových deformací byly identifikovány jako projev textury. V souvislosti s diskusí nelinearity vznikl i velký počet prací věnovaných problematice elastické anizotropie a trojosé napjatosti.

Vývoj metodiky rentgenové tenzometrie v posledních letech je ovlivňován především

- novými konstrukčními řešeními přístrojů („nástup“ θ/θ difraktometrů), zdokonalením běžně používaných prvků rtg optiky (vrstevnatá zrcadla poskytující intenzivní paralelní svazek primárního záření) [19] a
- zvýšeným zájmem o difrakční studium reálné struktury tenkých povrchových vrstev a nanokrystalických materiálů [20].

5. Zkušenosti laboratoře strukturní rentgenografie FJFI ČVUT v Praze s aplikací rentgenové tenzometrie v technické praxi

Tématika problémů řešených v laboratoři strukturní rentgenografie FJFI ČVUT v Praze na žádost našich i zahraničních pracovišť, je neobyčejně pestrá. Strojírenské závody se zajímaly o průběh zbytkových napětí v povrchových vrstvách šroubových pružin, v převodovkách osobních automobilů, nápravách motorových lokomotiv, v klikových hřídelích, ozubených kolech, olejářských trubkách, válcovaných ocelových pásech, závitech řezaných různými technologiemi. Byly podrobně analyzovány stavy napjatosti vyvolané v povrchových vrstvách kovů laserovým nebo elektronovým paprskem, broušením, soustružením, frézováním, honováním, balotinováním, indukčním kalením a svařováním, sledována účinnost různých příčin relaxace zbytkových napětí ve strojních dílech i speciálně připravených laboratorních vzorcích. Již delší dobu je předmětem výzkumu zbytková napjatost povrchových vrstev vyvolaná dělením materiálů jak technologiemi klasickými, tak i nekonvenčními. Kromě kovů a slitin byla zkoumána také pokročilá technická keramika.

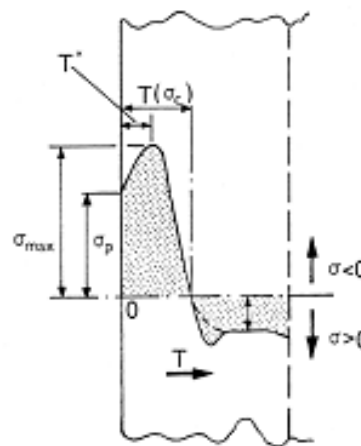
6. Stav zbytkové napjatosti vyvolaný kuličkováním

Kuličkování je metodou umožňující "za studena" zpracovávat povrch kovových dílů nárazy kovových, skleněných, případně keramických sférických částic (kuliček). Údery částic na povrch je v tenké vrstvě vyvolána plastická deformace. Protože spodní vrstvy brání, aby se takto kovaná povrchová vrstva mohla rozšířit, vzniká v ní zbytkové tlakové napětí. Tato technologie se užívá zejména ke zvýšení únavové životnosti, k prevenci koroze pod napětím, k rovnání a tvarování součástí, ke snížení porozity, k čištění povrchu, k odstraňování závad vzniklých v dřívějších fázích technologického postupu, k mechanickému zpevnění povrchů apod.

Pro optimální konstrukci součástí je nutné vědět jaká je tloušťka tlakově předpjaté povrchové vrstvy, jaký je v ní průběh napětí, např. v jaké hloubce pod povrchem je maximum tlakových napětí apod. Zmíněné veličiny závisí na struktuře a vlastnostech materiálu a na intenzitě balotinování. Ta se určuje jako průhyb pásku s definovanými rozměry, strukturou a

tepelným zpracováním (tzv. Almenův pásek). Např. intenzita 0.5 mmA způsobuje průhyb 0.5 mm pásku typu A [21 – 25].

Obecný charakter hloubkového profilu zbytkových napětí v povrchové vrstvě po kuličkování je na obr. 1.



Obr. 1 Průběh zbytkových napětí σ v různých vzdálenostech T od povrchu kuličkováného materiálu; $T(\sigma_c)$ – tloušťka tlakově předpjaté vrstvy, σ_p – povrchové napětí, σ_{max} – maximální hodnota tlakového napětí (v hloubce T^* pod povrchem), $\sigma > 0$ je tahové zbytkové napětí, tlakové zbytkové napětí $\sigma < 0$.

Účelem příspěvku je experimentální stanovení podpovrchových průběhů napětí a mikrotvrdosti ve vybraných materiálech po různých intenzitách balotínování a určení jejich vzájemné korelace, popř. jejich vztah k mechanickým vlastnostem materiálů.

6.1 Zkoumané materiály a použité metody

K výrobě zkušebních vzorků s rozměry $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$ byly použity dva materiály (**B**, **C**) na bázi železa:

- Mn–Cr ocel pro chemicko–tepelné zpracování - ČSN 14 220 (**B**),
- Cr–Mo speciální korozivzdorná ocel ČSN 17 135 (**C**).

Tab. 1 Chemické složení zkoumaných materiálů.

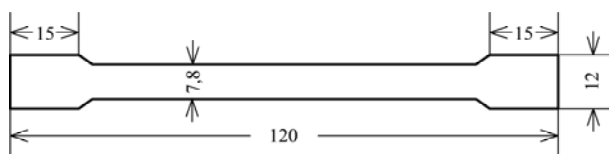
Steel	Zastoupení příměsí, váhová %			
	C	Mn	Mo	Cr
B	0.14 – 0.19	1.1 – 1.4	–	0.8 – 1.1
C	0.17 – 0.23	0.5 – 1	0.8 – 1.2	10 – 12.5

Připravené vzorky byly žíhány při teplotě 550 °C po dobu 2 hodin v argonové atmosféře za účelem odstranění zbytkových napětí vložených při jejich výrobě. Ochlazení na pokojovou teplotu bylo realizováno samovolně v uzavřené peci.

Balotínování obou čtvercových povrchů $50 \times 50 \text{ mm}^2$ vzorků bylo realizováno se dvěma odlišnými intenzitami dopadajících částic – 0.2 mmA, 0.4 mmA. Vzorek materiálu **B** s nižší intenzitou balotínování má označení **B11**, vyšší intenzita balotínování byla u vzorku **B13** a podobně je to u vzorků materiálu **C**.

Mechanické zkoušky

Ze studovaných materiálů byly připraveny speciální vzorky tvaru plochých tyček tloušťky 2 mm, viz obr. 2. Ty byly deformovány při pokojové teplotě na trhačím stroji *INSTRON 1195* s rychlostí deformace $4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



Obr. 2. Tvar vzorku pro trhačí zkoušku, rozměry jsou v mm.

Difrakční studium mřížkových deformací

Ke stanovení makroskopických napětí byla použita rentgenografická tenzometrická metoda „ $\sin^2\psi$ ” [3] na ω -goniometru *Siemens* se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzovaná difrakční linie $\{211\}$ α -Fe. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu 2θ na $\sin^2\psi$; ψ je úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími atomovými mřížkovými rovinami. K výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2} s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, $-s_1 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$.

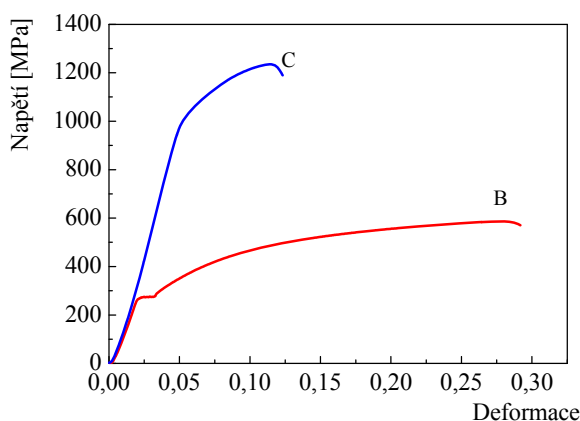
Mikroskopické deformace, resp. napětí byly určovány z tvaru difrakčních profilů stejné difrakční linie jako pro určení makroskopických napětí metodou Voigtovy funkce (tvarového faktoru – *Single line Voigt function method*) [26].

Elektrolytické leptání vzorků bylo prováděno na leštičce zn. *LectroPol-5* firmy *Struers* elektrolytem A2 dodávaným výrobcem přístroje.

6.2. Výsledky provedených analýz a jejich diskuse

Tahové zkoušky

Na obr. 3 jsou vyneseny hodnoty napětí v závislosti na deformaci pro studované materiály. Významné body těchto křivek jako mez kluzu, mez pevnosti a maximální prodloužení jsou shrnuty v tab. 2. Je patrné, že materiál **B** je snadněji tažitelný oproti materiálu **C**, který je pevnější, ale křehčí.



Tab. 2. Významné body tahových zkoušek

Materiál	Mez kluzu R_p [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Max. prodlouž. ϵ_{\max}
B	269	585	0,288
C	1007	1232	0,113

Obr. 3. Zkouška tahem plochých těles z materiálu **B** a **C**.

Rentgenová difrakce

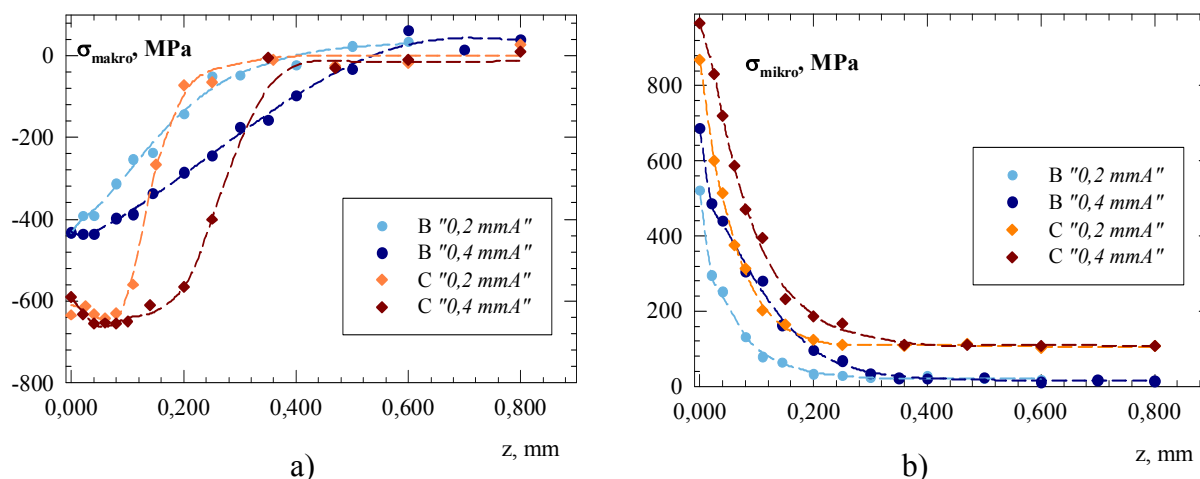
Obrázky 5a, 5b znázorňují závislosti makroskopických σ_{macro} a mikroskopických napětí σ_{micro} na hloubce zjištěné v povrchových vrstvách obou analyzovaných materiálů.

Je zřejmé, že povrchové hodnoty mikroskopických napětí intenzivněji balotinovaných vzorků jsou pro oba materiály větší. Naproti tomu povrchové hodnoty makroskopických napětí téměř nezávisí na intenzitě balotinování. Intenzita balotinování se projevuje zejména v podpovrchových hodnotách napětí, a to jak mikroskopických tak makroskopických.

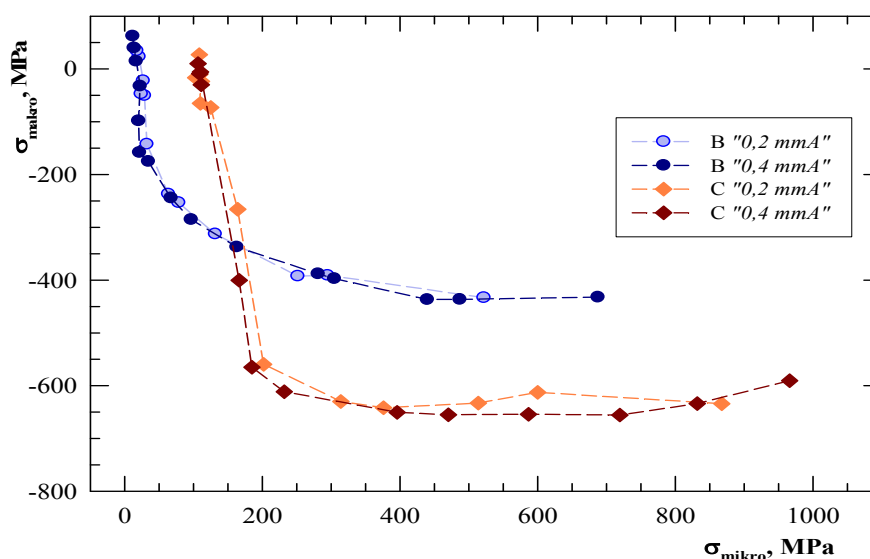


Ovlivněná vrstva intenzivněji upravených povrchů je širší. Tato zjištění korespondují s poznatky teorie plasticity, kdy se plasticky deformovaná oblast začne vytvářet nikoli na povrchu, ale v jisté hloubce pod povrchem, a zároveň je její velikost určena silou působící na povrch.

Porovnáním hloubkových průběhů makroskopických napětí můžeme konstatovat, že materiály **B** a **C** se výrazně liší. Průběh u materiálu **C** je strmější a je na něm dokonce pozorováno jisté maximum tlakových napětí v hloubce přibližně 70 μm . Tloušťka ovlivněné vrstvy se z hlediska obou sledovaných napěťových charakteristik liší. V materiálu **C** jsou pozorovány nenulové hodnoty mikroskopických deformací i v neovlivněné části materiálu.



Obr. 4 Hloubkové průběhy podpovrchových zbytkových makroskopických σ_{makro} (a) a mikroskopických σ_{mikro} (b) napětí vzorků B (14220) a C (M300).



Obr. 5 Závislost mezi hodnotami mikroskopických σ_{mikro} a makroskopických σ_{makro} napětí naměřených na analyzovaných vzorcích

Vzájemný vztah mezi mikroskopickým a makroskopickým napětím je na obr. 5. Tato závislost má v případě obou sledovaných ocelí kvalitativně stejný charakter, který prakticky nezávisí na intenzitě tryskání a je kvantitativně determinován vlastnostmi materiálu.

6.3. Hlavní závěry

- Ve všech analyzovaných případech byl pozorován izotropní rovinný stav zbytkové napjatosti.
- Materiál **C** má větší povrchové hodnoty zbytkových napětí (jak mikroskopických, tak tlakových makroskopických) než materiál **B**.
- Intenzita balotínování se z hlediska napětí projevuje zejména gradientem a hloubkou ovlivněné vrstvy. Povrchové hodnoty mikroskopických napětí jsou v případě větší

intenzity větší. Naproti tomu povrchové hodnoty makroskopických napětí vzorků opracovaných s různou intenzitou balotínování jsou přibližně stejné.

- Ovlivněná oblast vzorků balotínovaných s menší intenzitou je zhruba 250 μm hluboká, pro větší intenzitu balotínování je tato oblast zhruba o 100 μm hlubší, tj. ca 350 μm .
- Zatímco průběhy mikroskopických napětí do hloubky materiálů jsou vždy monotónní, tlaková makroskopická napětí dosahují svého maxima pod povrchem vzorků.

Poděkování: Tato práce vznikla v rámci realizace projektu Grantové agentury České republiky č. 106/07/0805.

8. Literatura

- [1] HAUKE, V. et al., Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, Elsevier Science B. V., 1997.
- [2] Kraus I., Ganev N.: Technické aplikace difrakční analýzy, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.
- [3] Kraus I., Ganev N.: Difrakční analýza mechanických napětí, Nakladatelství ČVUT, Praha 1995.
- [4] Joffe A.F., Kirpičeva M.V.: Phil.Mag. 43, 1922, 204.
- [5] Joffe et al.: Nature 113, 1924, 424.
- [6] Lester H.H., Aborn R.H.: Army Ordnance 6, 1925-26, 120, 200, 283, 364.
- [7] Sachs G., Weerts J.: Z. Physik 64, 1930, 344.
- [8] Wever F., Möller H.: Arch EHW 5, 1931/2, 215.
- [9] Gisen F. et al.: Z. techn. Phys. 17, 1936, 145.
- [10] Glocker R. et al.: Z. techn. Phys. 19, 1938, 194.
- [11] Barrett C.S., Gensamer M.: Physics 7, 1936, 1.
- [12] Wever F., Möller H.: Arch. EHW 5, 1931/32, 215.
- [13] Möller H., Barbers J.: Mitt.Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. 17, 1935, Lfg.12, 157.
- [14] Möller H., Neerfeld H.: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. 21, 1939, Lfg.21, 289.
- [15] Stäblein f.: Krupp Forschungsber. 2, 1939, 29.
- [16] Kemnitz G.: Z. techn. Phys. 23, 1942, 77.
- [17] Vasiljev D.M.: Zavodskaja laboratorija 25, 1959, 70.
- [18] Macherauch E., Müller P.: Z. angew. Phys. 13, 1961, 305.
- [19] <http://www.panalytical.com/index.cfm?pid=368>
- [20] Welzel U, Ligot J. et al.: J. Appl. Cryst. 38, 2005, 1 – 29.
- [21] Ganev, N., Skrzypek, S., Sedlák, P.: Inzynieria Materialowa 3, 140, 2004, 576–578.
- [22] Drahekoupil, J., Ganev, N., Čerňanský, M., Stranyánek M., Čtvrtlík R.: Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology, 15, 2008, no. 1, 50 – 54.
- [23] Ganev, N., Čerňanský, M., Drahekoupil, J., Kolařík, K.: *Contribution to Diffraction Analysis of Macroscopic and Microscopic Residual Stresses in Surface Layers of Shot-peened Steels*. CD-ROM of Proceedings EAN 2005.
- [24] Drahekoupil, J., Ganev, N., Čerňanský, M., Boháč, P., Čtvrtlík, R., Stranyánek, M.: Strains and Hardness in Surface Layers of Shot-Peened Steels. In Abstracts of the 5th Size-Strain conference 'Diffraction Analysis of the Microstructure of Materials' (SS-V), October 7 – 9, 2007, Garmisch-Partenkirchen, Germany, pp. 48 – 49.
- [25] Drahekoupil, J., Čerňanský, Ganev, N., Kolařík, K., Pala Z.: Solid state phenomena B, 130, 2007, 77 – 80.
- [26] De Keijser, Th.H., Langford, J.I., Mittemeijer, E.J., Vogels, A.B.P.: *Use of the Voigt function in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening*. Journal of Applied Crystallography, 15, 1978, 308-314.

